



Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського»
Фізико-технічний інститут

ОСНОВИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ

Методичні вказівки до практичних занять
з навчальної дисципліни «Основи конвективного теплообміну»
для студентів напряму підготовки 6.040204 «Прикладна фізика»

*Рекомендовано
Методичною радою ФТІ
НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського»
08.06.2017 р., протокол № 6*

Київ – 2017

Основи конвективного теплообміну: метод. вказівки до практ. занять / уклад.: Н.А. Панченко, А.А. Халатов. – К: НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», 2017. – 32 с.

ОСНОВИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ

Методичні вказівки до практичних занять
з навчальної дисципліни «Основи конвективного теплообміну»
для студентів напряму підготовки 6.040204 «Прикладна фізика»

Укладачі: *Н.А. Панченко – канд. техн. наук, старший викладач
кафедри Фізики енергетичних систем НТУУ “КПІ ім.
І.Сікорського”*
*А.А. Халатов – д-р техн. наук, проф., зав. кафедри
Фізики енергетичних систем НТУУ “КПІ ім.
І.Сікорського”*

Рецензент: *А.С. Коваленко – канд. техн. наук, доц., ст.н.с
Інституту технічної теплофізики НАН України*

*Ухвалено: на засіданні кафедри фізики енергетичних систем НТУУ
«КПІ ім. І.Сікорського» (протокол № 6/2017 від 12.04.2017 р.).*

*Ухвалено: на засіданні вченої ради Фізико-технічного інституту НТУУ
«КПІ ім. І.Сікорського» (протокол № 6/2017 від 24.05.2017 р.).*

*Ухвалено: на засіданні методичної ради Фізико-технічного інституту
НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського» (протокол № 6 від 08.06.2017 р.).*

ЗМІСТ

Зміст.....	3
Передмова.....	4
Вступ.....	5
Мета та зміст практичних занять.....	7
Тема 1. Основи теорії подібності фізичних явищ.....	8
Тема 2. Тепловіддача при поздовжньому обтіканні плоскої пластини ...	9
Тема 3. Метод ефективної довжини.....	12
Тема 4. Тепловіддача при поперечному обтіканні одиночного циліндра.....	14
Тема 5. Тепловіддача при поперечному обтіканні пучків труб.....	16
Тема 6. Тепловіддача в трубах і каналах.....	18
Тема 7. Тепловіддача при русі газів з високою швидкістю.....	21
Тема 8. Тепловіддача при вільній конвекції.....	23
Тема 9. Теплообмін випромінюванням.....	26
Рекомендована література.....	29
Додатки.....	30

ПЕРЕДМОВА

Методичні вказівки до практичних занять є частиною учбово-методичного комплексу з навчальної дисципліни «Основи конвективного теплообміну» для бакалаврів, що включає учбову програму дисципліни, курс лекцій, методичні рекомендації до виконання курсової роботи та інші навчальні матеріали.

Метою практичних занять є закріплення теоретичного матеріалу лекційного курсу та отримання навичок вирішення фізико-технічних і інженерних задач в області теплообміну.

Призначено для студентів навчального напрямку 6.040204 «Прикладна фізика» спеціалізації 6.04020401 – «Фізика новітніх джерел енергії».

ВСТУП

Теплообмін – самовільний процес переносу теплоти в просторі з неоднорідним розподілом температури. Згідно з другим законом термодинаміки, теплообмін завжди відбувається в певному напрямку: *від тіл з більш високою температурою до тіл з більш низькою*. У момент балансу температур, теплообмін припиняється.

Види теплообміну

Відомо три простих (елементарних) механізми передачі теплоти:

- **Теплопровідність** – молекулярний перенос теплоти в суцільному середовищі, котрий виконується за рахунок безпосереднього зіткнення часток, що мають різну температуру. Це призводить до обміну енергією між молекулами, атомами або вільними електронами. Теплопровідність можлива в твердих, рідких і газоподібних середовищах.
- **Конвекція** – перенесення теплоти при русі об'ємів газу або рідини в просторі. Розрізняють вільну (природну) і вимушену конвекцію.

Вільна конвекція викликана дією неоднорідного поля зовнішніх масових сил (гравітаційного, інерційного, магнітного або електричного). *Вимушена конвекція* викликана дією зовнішніх поверхневих сил, прикладених на межах системи, або дією однорідного поля масових сил, прикладеного до рідини всередині системи. Вимушена конвекція може відбуватися за рахунок кінетичної енергії, повідомленої рідиною поза системою. Виникнення і інтенсивність вільного або природного руху визначається тепловими умовами процесу, і залежать від типу рідини, різниці температур і об'єму, в якому протікає процес.

Конвективним теплообміном називається одночасне перенесення теплоти конвекцією і теплопровідністю, так як при русі рідини або газу неминуче зіткнення окремих частинок, які мають різні температури.

- **Радіаційний теплообмін** – процес передачі теплоти електромагнітними хвилями. Цей процес обумовлений тим, що внутрішня енергія речовини перетворюється в енергію випромінювання (енергію фотонів або електромагнітних хвиль), далі відбувається поширення випромінювання в просторі, енергія випромінювання поглинається речовиною, яка виявилась на шляху потоку випромінювання. Істотна відмінність радіаційного теплообміну від інших видів теплообміну полягає в тому, що він може протікати і за відсутності матеріального середовища, що розділяє поверхні теплообміну, так як здійснюється в результаті поширення електромагнітного випромінювання.

Відомо три види складного перенесення теплоти, які є поєднанням елементарних видів теплообміну:

- **Тепловіддача** – конвективний теплообмін між потоками рідини або газу та поверхнею твердого тіла. Включає теплопровідність (в твердому тілі й потоці рідини і газу) і конвекцію.
- **Теплопередача** – теплообмін між двома теплоносіями через розділяючу стінку. Складається з тепловіддачі (з обох сторін стінки) і теплопровідності в стінці.
- **Радіаційно-конвективний теплообмін** – теплообмін, обумовлений спільним перенесенням теплоти радіаційним теплообміном, теплопровідністю і конвекцією.

МЕТА ТА ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Мета практичних занять – закріплення теоретичного матеріалу лекційного курсу та набуття навичок в практичних розрахунках теплових процесів. З дисципліни заплановані практичні заняття в обсязі 18 годин. Зміст практичних занять наведено в таблиці.

№	Зміст
Модуль 1. Основи теорії подібності фізичних явищ.	
1	Тема 1. Математичний опис тепловіддачі. Граничні умови. Подібні явища, числа подібності, рівняння подібності. Фізичний зміст чисел подібності. Рівняння подібності для тепловіддачі і вільної конвекції.
Модуль 2. Тепловіддача при зовнішньому обтіканні тіл.	
2	Тема 2. Тепловіддача при поздовжньому обтіканні плоскої пластини, використання рівнянь подібності. Місцевий та середній коефіцієнти тепловіддачі. Визначення кількості теплоти, переданого пластиною. Пластина з початковою ділянкою, що не обігрівається.
3	Тема 3. Метод ефективної довжини. Розрахунок тепловіддачі для конуса і сфери з використанням рівнянь подібності для плоскої пластини і методу ефективної довжини.
4	Тема 4. Тепловіддача при поперечному обтіканні одиничного циліндра. Визначення кількості теплоти, що передається циліндром. Залежність коефіцієнта тепловіддачі від кута атаки.
5	Тема 5. Тепловіддача при поперечному обтіканні пучків труб. Шаховий і коридорний пучки труб. Визначення кількості теплоти, що передається пучком труб.
Модуль 3. Тепловіддача в трубах і каналах.	
6	Тема 6. Тепловіддача в трубі при ламінарному і турбулентному режимі.
7	Тема 7. Тепловіддача при русі газів з високою швидкістю.
Модуль 4. Тепловіддача при вільній конвекції.	
8	Тема 8. Вільна конвекція біля нескінченної плоскої стінки. Вільна конвекція в замкнутому просторі. Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності.
Модуль 5. Теплообмін випромінюванням.	
9	Тема 9. Закони теплообміну випромінюванням. Теплообмін випромінюванням між паралельними стінками. Випромінювання газів. Теплообмін випромінюванням між газом і оболонкою.

Тема 1. Основи теорії подібності фізичних явищ

Мета – ознайомитись з основними положеннями теорії подібності фізичних явищ. Проаналізувати фізичний зміст чисел подібності. Розглянути загальний вигляд рівнянь подібності для вимушеної і вільної конвекції.

Число Нуссельта – безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі. Характеризує зв'язок між інтенсивністю теплообміну за рахунок конвекції і теплопровідності (в умовах нерухомої середовища).

$$Nu = \frac{\alpha \ell}{\lambda}$$

Число Рейнольдса характеризує співвідношення сил інерції і в'язкості в потоці, що рухається.

$$Re = \frac{w \ell}{\nu},$$

де $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – кінематична в'язкість.

Абсолютна величина числа Рейнольдса визначає режим течії – ламінарний або турбулентний.

Число Прандтля характеризує співвідношення між інтенсивностями молекулярного переносу кількості руху і переносу теплоти теплопровідністю. Є фізичною характеристикою середовища і залежить тільки від його термодинамічної стану.

$$Pr = \frac{\nu}{a},$$

де $a = \frac{\lambda}{c \rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, характеризує теплову інерцію тіла. Чим більше a , тим швидше нагрівається та охолоджується тіло. Для двохатомних газів число Прандтля становить 0.7...0.72.

Число Грасгофа характеризує співвідношення виштовхувальної сили Архімеда, викликаній нерівномірним розподілом густини рідини (або газу) в неоднорідному полі температур, і силами в'язкості.

$$Gr = \frac{g \ell^3}{\nu^2} \beta \cdot \Delta T,$$

де β – коефіцієнт об'ємного розширення середовища.

Число Пекле характеризує відношення конвективного та молекулярного перенесення теплоти в потоці

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{w \ell}{a}$$

Величину l , яка входить у числа подібності, називають *визначальним розміром*. Температуру, за якої вибирають значення теплофізичних величин, називають *визначальною температурою*.

Питання для самопідготовки:

1.1. Перерахуйте прості і складні способи перенесення теплоти. Наведіть приклади. Дайте визначення вимушеної і вільної конвекції.

1.2. Що називають конвективним теплообміном? Що таке тепловіддача? Як переноситься теплота при тепловіддачі

1.3. Запишіть закон Ньютона і розкрийте фізичну сутність коефіцієнта тепловіддачі. Визначення локального і середнього коефіцієнта тепловіддачі.

1.4. Система диференціальних рівнянь тепловіддачі. Умови однозначності.

1.5. Порядок розрахунку тепловіддачі за диференціальними рівняннями конвективного теплообміну.

1.6. Які фізичні явища називаються подібними? Які явища називаються аналогічними?

1.7. Що таке константи подібності і числа подібності?

1.8. Які числа подібності впливають з системи диференціальних рівнянь тепловіддачі?

1.9. Перерахуйте визначальні числа подібності для тепловіддачі при вільному і вимушеному русі рідини. Запишіть загальний вигляд рівняння подібності для даних випадків.

1.10. Сформулюйте три теореми подібності.

1.11. Які існують режими течії рідини? Чим вони характеризуються і як відбувається перехід?

1.12. Як необхідно узагальнювати результати експериментів по тепловіддачі?

Тема 2. Тепловіддача при поздовжньому обтіканні плоскої пластини

Мета – освоїти навички вирішення практичних задач. Розглядається розрахунок тепловіддачі близько плоскої пластини, використання рівнянь подібності, місцевий та середній коефіцієнти тепловіддачі. Визначення кількості теплоти, що передано пластиною. Розрахунок тепловіддачі для пластини з початковою ділянкою, що не обігрівається.

Рівняння подібності для місцевого і середнього коефіцієнтів тепловіддачі при поздовжньому обтіканні пластини у випадку ламінарної течії з урахуванням зміни значень фізичних параметрів у поперечному перерізі потоку для краплинних рідин:

$$Nu_{fx} = 0,33 \cdot Re_{fx}^{0,5} Pr_f^{0,33} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}$$

$$\overline{Nu}_{fl} = 0,66 \cdot Re_{fl}^{0,5} Pr_f^{0,33} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}$$

При турбулентному режимі обтікання пластини для розрахунку тепловіддачі (місцевої та середньої) рекомендують такі рівняння ($T_w = \text{const}$):

$$Nu_{fx} = 0,029 \cdot Re_{fx}^{0,8} Pr_f^{0,4} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}$$

$$\overline{Nu}_{fl} = 0,036 \cdot Re_{fl}^{0,8} Pr_f^{0,4} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}$$

Точне визначення меж перехідного режиму течії має певні складнощі, для розрахунку зазвичай беруть $Re_{кр} \approx (2 \dots 5) \times 10^5$. У наведених формулах за визначальну температуру беруть температуру потоку t_f . Визначальний розмір – координата x (локальні) або довжина пластини l (середні значення).

У випадку початкової ділянки без обігріву має місце неодночасний розвиток гідродинамічного і теплового примежового шару. Цей процес вносить зміну в коефіцієнт тепловіддачі. При ламінарному режимі вводиться поправка $\left(\frac{x_l}{x} \right)^{0,2}$. Тоді рівняння має вигляд:

$$Nu_{fx} = 0,33 \cdot Re_{fx_l}^{0,5} Pr_f^{0,33} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{x_l}{x} \right)^{0,2}$$

Визначальний розмір в цьому випадку визначається від початку ділянки, що обігрівається $x_l = x - x_0$, де x_0 – розмір ділянки без обігріву.

Задача №2.1. Тонку пластину довжиною $l = 125$ мм обтікає поздовжній потік рідини. Температура набігаючого потоку $t_f = 20$ °C. Обчислити значення місцевих коефіцієнтів тепловіддачі для різних значень відстані $x = 0,1$ л; $0,2$ л; $0,5$ л; $1,0$ л від передньої кромки пластини. Розрахунок провести для двох випадків:

а) пластину обтікає повітря при швидкості набігаючого потоку $w = 10$ м/с.

б) пластину обтікає вода $w = 2$ м/с.

При розрахунку прийняти $Re_{кр} = 5 \times 10^5$.

Задача №2.2. Плоска тонка пластина довжиною $l = 2,5$ м омивається потоком повітря зі швидкістю $w = 3$ м/с при температурі $t_f = 20$ °С. Визначити місцеві коефіцієнти тепловіддачі для пластини $x = 0,2$ л; $0,5$ л і середній коефіцієнт тепловіддачі. При розрахунку прийняти $Re_{кр} = 5 \times 10^5$.

Задача №2.3. Плоску пластину обтікає поздовжній потік повітря. Швидкість і температура потоку, що набігає рівні відповідно $w = 6$ м/с і $t_f = 20$ °С. Обчислити кількість теплоти, що віддається повітрю за умови, що температура поверхні пластини $t_w = 80$ °С, а її розмір уздовж потоку $l = 1$ м і поперек потоку $b = 0,9$ м.

Задача №2.4. Плоску пластину довжиною $l = 1$ м обтікає поздовжній потік повітря. Швидкість і температура набігаючого потоку повітря $w = 80$ м/с і $t_f = 10$ °С. Перед пластиною встановлена турбулізуюча решітка, внаслідок чого рух в примежовому шарі по всій довжині пластини турбулентний. Обчислити середнє значення коефіцієнта тепловіддачі з поверхні пластини і значення місцевого коефіцієнта тепловіддачі на задній кромці.

Задача №2.5. Для умов задачі №2.4 обчислити місцеві значення коефіцієнтів тепловіддачі на відстанях $x = 0,1$ л; $0,2$ л; $0,8$ л від передньої кромки пластини. Побудувати графік зміни місцевих значень коефіцієнта тепловіддачі по довжині пластини.

Задача №2.6. Гладка плита довжиною $l = 1,5$ м і шириною $b = 1$ м обдувається поздовжнім потоком повітря зі швидкістю $w = 5$ м/с. Визначити середній по довжині коефіцієнт тепловіддачі і кількість теплоти що буде віддана повітрю, якщо температура поверхні пластини $t_w = 110$ °С, а температура обдуваючого потоку повітря $t_f = 20$ °С. При розрахунку прийняти $Re_{кр} = 4 \times 10^5$.

Задача №2.7. Тонка пластина довжиною $l = 2$ м і шириною $b = 0,5$ м по обидва боки омивається поздовжнім потоком води зі швидкістю $w = 5$ м/с. Температура набігаючого потоку $t_f = 10$ °С, середня температура поверхні пластини $t_w = 50$ °С. Визначити середній по довжині коефіцієнт тепловіддачі і кількість теплоти, що віддається пластиною воді.

Задача №2.8. Тонку пластину довжиною $l = 0,2$ м обтікає поздовжній потік повітря. Швидкість і температура потоку, що набігає рівні відповідно $w = 150$ м/с і $t_f = 20$ °С. Визначити середнє значення коефіцієнта тепловіддачі

і густину теплового потоку, за умови, що температура поверхні пластини $t_w = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Розрахунок провести в припущенні, що по всій довжині пластини режим течії турбулентний.

Задача №2.9. Тонку пластину довжиною $l = 2\text{ м}$ і шириною $a = 1,5\text{ м}$ обтікає поздовжній потік повітря. Швидкість і температура потоку, що набігає рівні відповідно $w = 3\text{ м/с}$ и $t_f = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура поверхні пластини $t_w = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити середній по довжині пластини коефіцієнт тепловіддачі і кількість теплоти, що віддається пластиною повітрю.

Задача №2.10. Обчислити з умов задачі №2.9 значення місцевих коефіцієнтів тепловіддачі для різних відстаней від передньої кромки пластини $x = 0,1\text{ л; } 0,2\text{ л; } 0,5\text{ л; } 1,0\text{ л}$. Побудувати графік залежності коефіцієнта тепловіддачі від відносної відстані x/l .

Задача №2.11. Пластина довжиною 500 мм і шириною $0,2\text{ м}$ має початкову ділянку без нагріву довжиною 100 мм . На поверхні пластини температура $t_w = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поздовжній потік води омиває пластину зі швидкістю $w = 0,05\text{ м/с}$. Температура води $t_f = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Порівняти з тепловим потоком для випадку, коли пластина обігривається по всій довжині.

Тема 3. Метод ефективної довжини

Мета – освоїти навички вирішення практичних задач з градієнтом тиску зовнішнього потоку на вісесиметричній поверхні довільної форми. Розглядається розрахунок тепловіддачі на поверхні конуса і сфери з використанням рівнянь подібності для плоскої пластини і методу ефективної довжини.

Ідея методу заснована на заміні теплообміну на вісесиметричному тілі довільної форми з градієнтом тиску теплообміном на плоскій пластині без градієнта тиску.

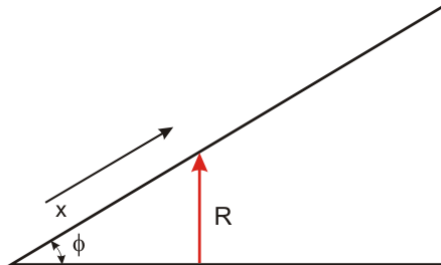
Для ламінарного потоку:

$$x_{ef} = \frac{\int_0^x \omega_{\infty} x R^2 x dx}{\omega_{\infty} R^2}$$

Для турбулентного потоку:

$$x_{ef} = \frac{\int_0^x \omega_\infty x R^{1,25} dx}{\omega_\infty R^{1,25}}$$

Приклад застосування: обтікання конуса, ламінарний режим:



$$R(x) = x \cdot \sin \varphi, \quad \omega_\infty = \text{const}$$

$$x_{ef} = \frac{\int_0^x \omega_\infty x \cdot \sin^2 \varphi dx}{\omega_\infty x \cdot \sin^2 \varphi} = \frac{x}{3}$$

$$Nu_{fef} = 0,33 \cdot Re_{fef}^{0,5} Pr_f^{0,33}$$

$$\text{або } Nu_{fef} = 0,33 \cdot \sqrt{3} \cdot Re_{fx}^{0,5} Pr_f^{0,33}$$

Задача №3.1. Конус довжиною $l = 1$ м, з кутом при вершині $\varphi = 30^\circ$, обтікає поздовжній ламінарний потік повітря. Швидкість і температура потоку, що набігає рівні відповідно $w = 3$ м/с і $t_f = 20$ °С. Обчислити значення місцевих коефіцієнтів тепловіддачі для різних відстаней від передньої точки $x = 0,1$ л; $0,2$ л; $0,5$ л; $1,0$ л. Визначити середній по довжині конуса коефіцієнт тепловіддачі і густину теплового потоку, за умови, що температура поверхні конуса $t_w = 50$ °С.

Задача №3.2. Як зміняться значення коефіцієнтів тепловіддачі, якщо конус замінити плоскою пластиною, а всі інші умови залишаться тими ж, що і в задачі №3.1?

Задача №3.3 Конус довжиною $l = 0,5$ м, з кутом при вершині $\varphi = 20^\circ$, обдувається поздовжнім потоком повітря зі швидкістю $w = 130$ м/с. Перед конусом встановлена турбулізуюча решітка, внаслідок чого рух в примежовому шарі по всій довжині пластини турбулентний. Визначити середнє значення коефіцієнта тепловіддачі і густину теплового потоку, за умови, що температура поверхні конуса $t_w = 60$ °С, а температура набігаючого потоку повітря $t_f = 10$ °С. Для обтікання конуса при турбулентному режимі прийняти $x_{ef} = \frac{x}{2,25}$.

Задача №3.4. Мідну сферу діаметром $0,2$ м обтікає поздовжній ламінарний потік повітря, що має температуру $t_f = 20$ °C і швидкість $w = 1$ м/с. Визначити значення місцевого коефіцієнта тепловіддачі для відстані $0,01$ м, якщо $x_{ef} = \frac{x}{4}$.

Тема 4. Тепловіддача при поперечному обтіканні одиночного циліндра

Мета – освоїти навички вирішення практичних задач. Розглядається розрахунок тепловіддачі при поперечному обтіканні одиночного циліндра. Визначення кількості теплоти, переданої циліндром. Залежність коефіцієнта тепловіддачі від кута атаки.

Середній по поверхні коефіцієнт тепловіддачі описується наступними рівняннями:

при $Re_d = 5 \dots 10^3$

$$\overline{Nu}_{df} = 0,5 \cdot Re_{df}^{0,5} Pr_f^{0,38} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}$$

при $Re_d = 10^3 \dots 2 \cdot 10^5$

$$\overline{Nu}_{df} = 0,25 \cdot Re_{df}^{0,6} Pr_f^{0,38} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}$$

при $Re_d = 3 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^6$

$$\overline{Nu}_{df} = 0,023 \cdot Re_{df}^{0,8} Pr_f^{0,4} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}$$

Визначальний лінійний розмір – зовнішній діаметр труби, визначальна температура – середня температура набігаючого потоку t_f .

Рівняння справедливі, якщо кут атаки потоку φ дорівнює 90° . У випадку якщо натікання потоку відбувається під кутом $\varphi = 30-90^\circ$, потрібно ввести поправочний коефіцієнт:

$$\varepsilon_\varphi = 1 - 0,54 \cdot \cos^2 \varphi$$

Задача №4.1. Мідний шинопровід круглого перерізу $d = 15$ мм охолоджується поперечним потоком сухого повітря. Швидкість і температура набігаючого потоку повітря відповідно рівні: $w = 1$ м/с і

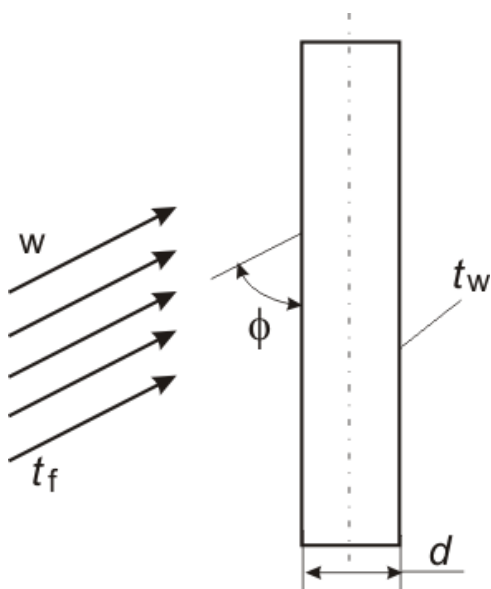
$t_f = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обчислити коефіцієнт тепловіддачі від поверхні шинопроводу до повітря, за умови, що температура поверхні $t_w = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задача №4.2. Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі від поверхні шинопроводу, якщо швидкість набігаючого потоку повітря зменшиться в 2 рази, а всі інші умови залишаться тими ж, що в задачі №4.1?

Задача №4.3. Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі від поверхні шинопроводу, якщо діаметр шинопровода зменшиться в 2 рази, а всі інші умови залишаться тими ж, що в задачі №4.1.

Задача №4.4. Водяний калориметр, який має форму трубки з зовнішнім діаметром $d = 15\text{ мм}$, помістили в поперечний потік повітря. Повітря має швидкість $w = 2\text{ м/с}$, направлену під кутом 90° до осі калориметра, і середню температуру $t_f = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. При стаціонарному тепловому режимі на зовнішній поверхні калориметра встановлюється постійна середня температура $t_w = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обчислити коефіцієнт тепловіддачі від трубки до повітря і тепловий потік на одиницю довжини калориметра.

Задача №4.5. Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі в умовах задачі №4, якщо швидкість повітря збільшиться в 2 і 4 рази?



До задачі № 4.6

Задача №4.6. Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі в умовах задачі №4.4, якщо повітря омиває трубку під кутом $\psi = 60^{\circ}$, а всі інші умови залишаться без зміни?

Задача №4.7. Циліндрична трубка діаметром $d = 20\text{ мм}$ охолоджується поперечним потоком води. Швидкість потоку $w = 1\text{ м/с}$. Середня температура води $t_f = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ і температура поверхні трубки $t_w = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від поверхні трубки до охолоджувальної води.

Задача №4.8. Визначити коефіцієнт тепловіддачі і тепловий потік на одиницю довжини в поперечному потоці повітря для труби діаметром $d = 30\text{ мм}$, якщо температура її поверхні $t_w = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура повітря

$t_f = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і швидкість $w = 5\text{ м/с}$. Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі, якщо швидкість повітря збільшити в 3 і 5 разів?

Задача №4.9. Визначити коефіцієнт тепловіддачі і тепловий потік на 1 м довжини труби, що омивається поперечним потоком води, якщо зовнішній діаметр труби $d = 20\text{ мм}$, температура її поверхні $t_w = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура води $t_f = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і її швидкість $w = 0,8\text{ м/с}$.

Задача №4.10. Труба з зовнішнім діаметром $d = 25\text{ мм}$ охолоджується поперечним потоком трансформаторного масла. Швидкість руху і середня температура масла рівні відповідно: $w = 1\text{ м/с}$ и $t_f = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити, яку температуру поверхні труби необхідно підтримувати, щоб густина теплового потоку становила $q = 4,5 \cdot 10^4\text{ Вт/м}^2$, і яким при цьому буде значення коефіцієнта.

Тема 5. Тепловіддача при поперечному обтіканні пучків труб

Мета – освоїти навички вирішення практичних задач. Розглядається розрахунок тепловіддачі при поперечному обтіканні пучків труб. Шаховий і коридорний метод розташування труб. Визначення середнього коефіцієнта тепловіддачі і кількості теплоти, переданого пучком труб потоку.

Середня інтенсивність тепловіддачі змінюється в початкових рядах пучка. Починаючи з 3 ряду, коефіцієнт тепловіддачі постійний і при змішаному режимі ($Re_{df} = 10^3 \dots 10^5$) розраховується з рівняння:

$$\overline{Nu}_{df} = C \cdot Re_{df}^n \cdot Pr_f^{0,3} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_s$$

Шахове розташування: $C=0,41$; $n=0,60$.

Коридорне розташування: $C=0,26$; $n=0,65$.

За визначальний лінійний розмір беруть зовнішній діаметр труб, а за визначальну температуру – середню температуру потоку. Швидкість потоку визначають у найвужчому перерізі ряду; ε_s – поправка, що враховує розміри поздовжнього і поперечного кроку.

Шахове розташування:

$$\text{якщо } \frac{s_1}{s_2} < 2 \rightarrow \varepsilon_s = \left(\frac{s_1}{s_2} \right)^{\frac{1}{6}},$$

$$\text{якщо } \frac{s_1}{s_2} > 2 \rightarrow \varepsilon_s = 1,12.$$

$$\text{Коридорне розташування: } \varepsilon_s = \left(\frac{s_1}{d} \right)^{-0,15}.$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі для всього пучка:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n} [\bar{\alpha}_1 + \bar{\alpha}_2 + n - 2 \bar{\alpha}_3],$$

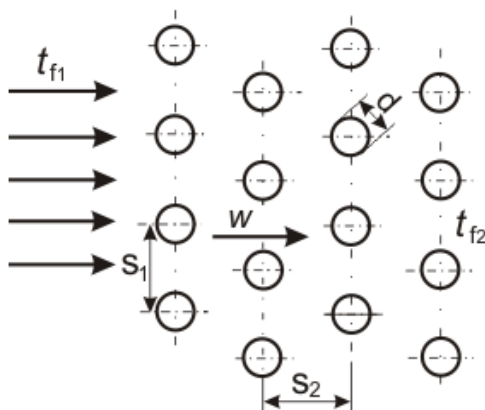
де n – кількість рядів.

Для першого ряду будь-якого пучка коефіцієнт тепловіддачі беруть 0,6 від визначеного значення для третього ряду. Для труб другого ряду шахового пучка поправочний коефіцієнт 0,7, а для коридорного – 0,9.

Задача №5.1. Визначити середній коефіцієнт тепловіддачі для десятирядного коридорного пучка, котрий обтікає поперечний потік трансформаторного масла, якщо зовнішній діаметр труб в пучку $d = 25$ мм, середня швидкість у вузькому перетині $w = 0,7$ м/с; середня температура масла $t_f = 50$ °С і середня температура поверхні труб $t_w = 85$ °С.

Задача №5.2. Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі для умов задачі № 5.1, якщо труби в пучку розташовані в шаховому порядку?

Задача №5.3. Визначити середній коефіцієнт тепловіддачі і кількість переданої теплоти у нагрівачі повітря, що складається з 11 рядів з числом труб $n = 83$, розташованих у шаховому порядку. Потік повітря омиває пучок труб під кутом $\psi = 70^\circ$ зі швидкістю в найбільш вузькому перерізі $w = 8$ м/с. Діаметр і довжина труб відповідно дорівнює $d = 33$ мм і $l = 3$ м; середня температура поверхні труб $t_w = 430$ °С, середня температура повітря $t_f = 350$ °С.



До задачі № 5.4

Задача №5.4. Визначити середній коефіцієнт тепловіддачі від поперечного потоку димових газів наступного об'ємного складу:

$$r_{H_2O} = 0,11; r_{CO_2} = 0,13 \text{ і } r_{N_2} = 0,76$$

до стінок труб котельного пучка. Труби діаметром $d = 80$ мм розташовані в шаховому порядку. Поперечний і поздовжній кроки труб рівні відповідно: $s_1 = 2,5d$; $s_2 = 2d$. Середня швидкість потоку газів у вузькому перерізі пучка $w = 10$ м/с. У

напрямку потоку газу пучок складається з чотирьох рядів труб з однаковою поверхнею. Температура газу перед пучком $t_{f1} = 1100$ °C, а за пучком $t_{f2} = 900$ °C. Забруднення поверхні труб не враховувати. За визначальної температури фізичні властивості димових газів даного складу наступні: $\nu = 174,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda = 0,109 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; $\text{Pr}_f = 0,58$.

Задача №5.5. У теплообміннику шаховий пучок труб обтікає поперечний потік трансформаторного масла. Зовнішній діаметр труб в пучку $d = 20 \text{ мм}$. Поперечний крок $s_1 = 2,5d$; поздовжній крок $s_2 = 1,5d$. Середня швидкість у вузькому перерізі пучка та середня температура масла відповідно рівні: $w = 0,6 \text{ м/с}$ і $t_f = 40$ °C. Знайти коефіцієнт тепловіддачі від поверхні труб до масла для третього ряду труб пучка за умови, що температура поверхні труб $t_w = 90$ °C. Обчислення провести для двох випадків:

- а) потік обтікає труби під кутом $\psi = 90^\circ$;
- б) потік обтікає труби під кутом $\psi = 60^\circ$.

ψ	90	80	70	60	50	40	30	20	10
ε_ψ	1,0	1,.	0,98	0,94	0,88	0,78	0,67	0,52	0,42

Задача №5.6. Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі для третього ряду труб в умовах задачі №5.5, якщо пучок труб буде обтікати поперечний потік води, а всі інші умови залишаться без змін ($d = 20 \text{ мм}$; $w = 0,6 \text{ м/с}$; $t_f = 40$ °C; $t_w = 90$ °C)?

Порівняння зробити за тих же кутах, тобто при $\psi = 90^\circ$ і 60° .

Тема 6. Тепловіддача в трубах і каналах

Мета – освоїти навички вирішення практичних задач. Розглядається розрахунок тепловіддачі в трубі при ламінарному і турбулентному режимі. Тепловіддача в трубах некруглого перерізу. Визначення переданої кількості теплоти.

При $\text{Re}_f < 2000 \dots 2200$ спостерігається ламінарна течія в трубах і каналах. Однак при великому температурному напорі в поперечному перерізі ламінарного потоку може виникнути вільний рух, обумовлений гравітаційними силами. Тому для ламінарного потоку розрізняють *в'язкісний* і *в'язкісно-гравітаційний* режими течії. У першому випадку сили в'язкості превалюють над силами гравітації і вільний рух практично не виникає. У

другому випадку сили в'язкості і підйомні сили співвідносні. В'язкісно-гравітаційний режим проявляється за умови

$$Gr \cdot Pr_m > 8 \cdot 10^5, \text{ де } t_m = \frac{1}{2} t_f + t_w.$$

При в'язкісному режимі для середньої тепловіддачі на довжині l :

$$\overline{Nu}_{dm} = 1,55 \cdot \left(Pe_m \cdot \frac{d}{l} \right)^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

Визначальна температура – $t_m = \frac{1}{2} t_f + t_w$, де $t_f = \frac{1}{2} t_{f1} + t_{f2}$ – середня температура потоку в трубі. Визначальний лінійний розмір – внутрішній діаметр труби, визначальна швидкість – середня швидкість потоку в трубі.

Поправка на неізотермічність $\left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,14}$ враховується тільки для крапельних рідин.

При в'язкісно-гравітаційному режимі для середньої тепловіддачі на довжині l :

$$\overline{Nu}_{df} = 0,15 \cdot Re_{df}^{0,33} Pr_f^{0,33} Gr \cdot Pr_f^{0,1} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l,$$

де ε_l – поправка на довжину труби; при $l/d < 50$ – $\varepsilon_l > 1,0$, при $l/d > 50$ – $\varepsilon_l = 1,0$. Визначальна температура – середня температура рідини в трубі t_f .

Значення коефіцієнта ε_l в залежності від l/d при в'язкісно-гравітаційному режимі.

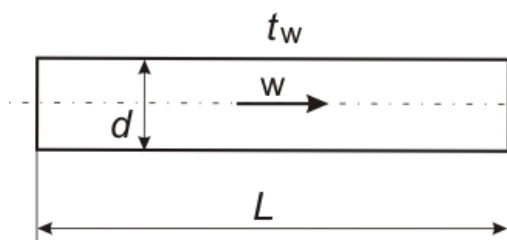
l/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ε_l	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,00

При турбулентному режимі для середньої тепловіддачі на довжині l :

$$\overline{Nu}_{fd} = 0,021 \cdot Re_{fd}^{0,8} Pr_f^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l,$$

при $l/d < 50$ – $\varepsilon_l = 1 + \frac{2}{l/d}$, при $l/d > 50$ – $\varepsilon_l = 1,0$. Визначальна температура – середня температура рідини в трубі t_f .

У першому наближенні рівняння можна використовувати і для каналів некруглого перерізу. При цьому визначальний розмір – еквівалентний діаметр каналу $d_{ек} = 4F/\Pi$, де F – площа поперечного перерізу каналу; Π – його периметр.



К задаче № 6.1

Задача №6.1. Обчислити середній коефіцієнт тепловіддачі при течії трансформаторного масла в трубі діаметром $d = 8 \text{ мм}$ і довжиною $l = 1 \text{ м}$, якщо середня по довжині труби температура масла $t_f = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, середня температура стінки трубки $t_w = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ і швидкість масла $w = 0,6 \text{ м/с}$.

Задача №6.2. Визначити середнє значення коефіцієнта тепловіддачі і кількість переданої теплоти при течії води в трубі діаметром $d = 40 \text{ мм}$ і довжиною $l = 3 \text{ м}$ зі швидкістю $w = 1 \text{ м/с}$, якщо середня температура води $t_f = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура стінки $t_w = 65 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача №6.3. Каналом квадратного перерізу, сторона якого $a = 10 \text{ мм}$ і довжина $l = 1600 \text{ мм}$, протікає вода зі швидкістю $w = 4 \text{ м/с}$. Обчислити коефіцієнт тепловіддачі від стінки каналу до води, якщо середня по довжині каналу температура води $t_f = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура внутрішньої поверхні каналу $t_w = 90 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача №6.4. Визначити значення коефіцієнта тепловіддачі і кількість переданої теплоти при течії води в трубі діаметром $d = 10 \text{ мм}$ і довжиною $l = 1,2 \text{ м}$, якщо середня по довжині труби температура води і стінки труби рівні відповідно $t_f = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ і $t_w = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, а витрата води $G = 7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$.

Задача №6.5. Визначити середній коефіцієнт тепловіддачі і кількість переданої теплоти при русі повітря в трубі діаметром $d = 56 \text{ мм}$ і довжиною $l = 2 \text{ м}$ зі швидкістю $w = 5 \text{ м/с}$, якщо середня температура повітря $t_f = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура стінки труби $t_w = 100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача №6.6. Визначити середнє значення коефіцієнта тепловіддачі і кількість переданої теплоти при течії трансформаторного масла в трубі діаметром $d = 10 \text{ мм}$ і довжиною $l = 1,5 \text{ м}$, якщо середня швидкість $w = 0,7 \text{ м/с}$, середня температура масла в трубі $t_f = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ і середня температура стінки труби $t_w = 30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача №6.7. По трубі з внутрішнім діаметром $d = 8 \text{ мм}$ і довжиною $l = 2 \text{ м}$ рухається вода зі швидкістю $w = 1,2 \text{ м/с}$. Середня температура води в трубі $t_f = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура поверхні труби $t_w = 90 \text{ }^\circ\text{C}$. Обчислити коефіцієнт

тепловіддачі від стінки труби до води і середню по довжині труби густину теплового потоку.

Задача №6.9. У каналі прямокутного перерізу 30×10 см рухається повітря, яке нагрівається від температури $t_{f1} = 40$ °C до $t_{f2} = 160$ °C. Визначити питомий тепловий потік, якщо витрата повітря $G = 0,8$ м³/с, а середня температура стінки каналу $t_w = 180$ °C.

Тема 7. Тепловіддача при русі газів з високою швидкістю

Мета – освоїти навички вирішення практичних задач. Розглядається розрахунок тепловіддачі при русі повітря з високою швидкістю.

Метод ефективної температури ($M < 22$). Використання ефективної температури у якості визначальної температури при визначенні теплофізичних властивостей потоку дозволяє врахувати вплив числа Маха і використовувати для розрахунку тепловіддачі рівняння подібності для невеликих швидкостей.

$$T_{ef} = \frac{1}{2}(T_w + T_f) + 0,22(T_r - T_f),$$

$$\text{де } T_r = T_f \left(1 + r \frac{k-1}{2} M^2 \right) - \text{температура відновлення, } r - \text{коефіцієнт}$$

відновлення. Значення коефіцієнта відновлення r залежить від числа Pr та режиму течії:

$$r = \sqrt{Pr} - \text{при ламінарному режимі;}$$

$$r = \sqrt[3]{Pr} - \text{при турбулентному режимі.}$$

Для наближених розрахунків в надзвукових соплах можна використати наступні рівняння подібності:

$$1. Nu_f = 0,021 \cdot Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43}$$

$$2. Nu_w = 0,0162 \cdot Re_w^{0,82} Pr_w^{0,82} \left(\frac{T_f^*}{T_w} \right)^{0,35}, \quad T^* = T_f \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)$$

$$3. Nu_m = 0,024 \cdot Re_m^{0,8} Pr_m^{0,4}, \quad T_m = \frac{1}{2} T_f + T_w$$

$$4. Nu_{ef} = 0,022 \cdot Re_{ef}^{0,8} Pr_{ef}^{0,43}, \quad T_{ef}$$

Задача №7.1. Надзвуковий літак летить на висоті $H = 15$ км зі швидкістю $M_H = 1,8$ (де число M_H – число Маха, рівне w_H/a); крило літака має тонкий симетричний профіль з хордою $b = 1,2$ м. Визначити густину теплового потоку за рахунок аеродинамічного нагріву в окремих точках профілю крила, розташованих від передньої кромки на відстані $x/b = 0,05; 0,1; 0,5; 0,9$, якщо в даний момент температури в цих точках $T_w = 296; 276; 256; 236$ К і політ відбувається з нульовим кутом атаки. Для повітря на висоті $H = 15$ км температура $T_H = T_f = 216,5$ К, густина $\rho_H = 0,195$ кг/м³, число $Pr \approx 0,7$; показник адіабати $k = 1,4$; $R = 287$ Дж/(кг·К).

Вказівка: при вирішенні задачі симетричне крило можна розглядати як тонку пластину (хорда – довжина пластини), знехтувати впливом можливих стрибків ущільнення на передній кромці і прийняти параметри повітря на зовнішній границі примежового шару як в незбуреному потоці.

Задача №7.2. Визначити конвективний питомий тепловий потік в критичному перерізі сопла рідинно-ракетного двигуна, якщо задані температура $T_f = 3060$ К, тиск $p_f = 40,8 \cdot 10^5$ н/м², масова витрата $G = 17,4$ кг/с і теплофізичні властивості суміші газів в таблиці, що додається; $R = 324,7$ Дж/(кг·К); показник адіабати $k = 1,219$. Крім того, заданий діаметр перерізу $D = 0,07$ м і відома температура на поверхні стінки сопла $T_w = 1200$ К.

Рекомендується порівняти результати розрахунку, отримані за різними формулами.

Таблиця до задачі № 7.2

Визначальна температура T, K	$\mu, 10^{-6}$ (н·с)/м ²	$\lambda, 10^{-3}$ Вт/(м·К)	c_p кДж/(кг·К)	Pr
3060	84.59	281.9	1.876	0.563
1200	45.61	126.3	1.654	0.603
2130	66.33	209.0	1.796	0.57

Задача №7.3. Визначити конвективний питомий тепловий потік в одному з перерізів частини сопла ЖРД що розширюється, якщо задані температура $T_f = 2020$ К, тиск $p_f = 3,9 \cdot 10^5$ н/м², масова витрата $G = 17,75$ кг/с та теплофізичні властивості суміші газів в таблиці, що додається; $R = 324,7$ Дж/(кг·К); показник адіабати $k = 1,219$. Крім того, заданий діаметр

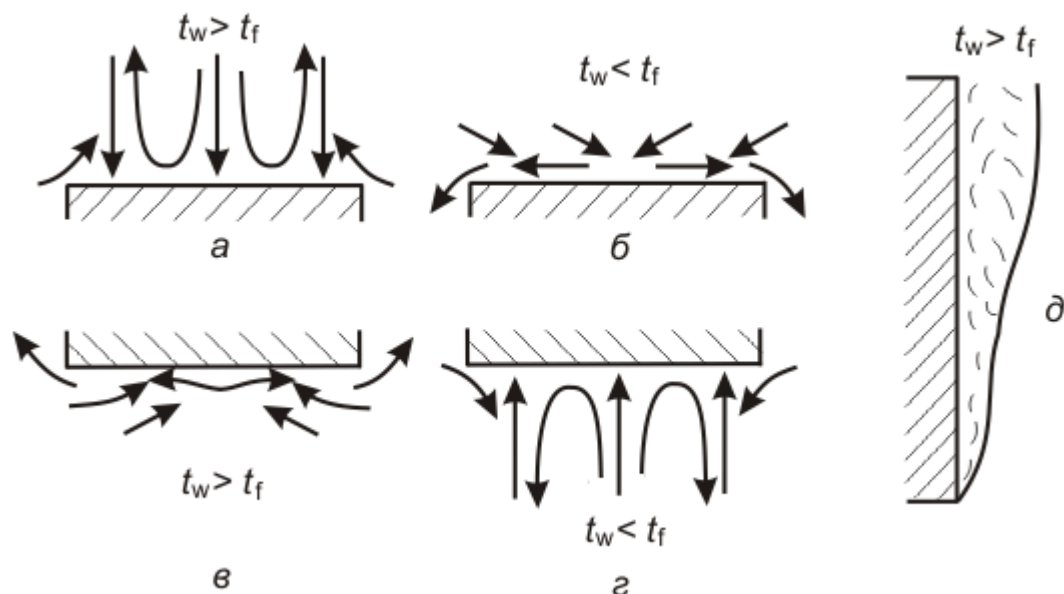
перерізу $D = 0.13$ м відстань від критичного перерізу, виміряна по твірній сопла, $x=0.15$ м і температура на поверхні стінки сопла $T_w = 1000$ К.
Рекомендується порівняти результати розрахунку, отримані за різними формулами.

Таблиця до задачі № 7.3

Визначальна температура T, K	$\mu, 10^{-6}$ (н·с)/м ²	$\lambda, 10^{-3}$ Вт/(м·К)	c_p , кДж/(кг·К)	Pr
1000	41	107,90	1,620	0,615
1770	59,43	185,61	1,750	0,56
1540	52,53	153,87	1,600	0,58
2100	66,33	208,97	1,796	0,57

Тема 8. Тепловіддача при вільній конвекції

Мета – освоїти навички вирішення практичних задач. Розглядається розрахунок тепловіддачі при вільній конвекції. Вільна конвекція біля нескінченної плоскої стінки. Вільна конвекція в замкнутому просторі. Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності.



Тепловіддача біля плоскої пластини в необмеженому просторі

Хоча тепловіддача для кожного з цих випадків індивідуальна, але рівняння подібності загальне:

$$Nu_m = C \cdot (Gr \cdot Pr)_m^n,$$

де визначальна температура – середня температура потоку; визначальний розмір – діаметр (труба, куля), висота (вертикальна стінка), найменший горизонтальний розмір (горизонтальна стінка).

$Gr \cdot Pr_m$	$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7 \dots 10^{13}$
	ламінальний	перехідний	турбулентний
C	1.18	0.54	0.135
n	1/8	1/4	1/3

Для схеми (а) і (г) розраховане значення коефіцієнта тепловіддачі необхідно збільшити на 30%, а для схем (б) і (в) – зменшити на 30%.

Якщо поверхня знаходиться під деяким кутом до горизонту φ , то вводить поправку: $\varepsilon_\varphi = \cos \varphi^{-0,25}$ – для стінки, що розташована тепловіддаючою поверхнею вгору; $\varepsilon_\varphi = \cos \varphi^{0,25}$ – для стінки, що розташована тепловіддаючою поверхнею вниз.

У замкнутому проміжку теплообмін здійснюється одним і тим же теплоносієм, тому важко відокремити одну поверхню від іншої. Розрахунок проводиться на основі рівняння теплопровідності для плоскої стінки:

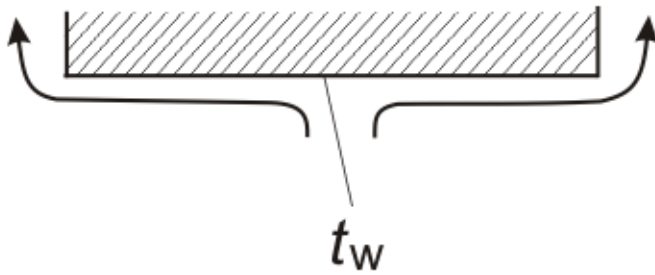
$$q = \frac{\lambda_{екв}}{\delta} (t_{w1} - t_{w2}), \quad \lambda_{екв} = \varphi_\kappa \cdot \lambda$$

$$\varphi_\kappa = C \cdot (Gr \cdot Pr)_f^n$$

Визначаюча температура – середня температура середовища, визначаючий розмір – товщина зазору $l \equiv \delta$.

$Gr \cdot Pr_f$	< 1000	$10^3 \dots 10^6$	$10^6 \dots 10^{10}$
C	$\varphi_\kappa = 1,0$	0.105	0.4
n		0.3	0.2

Задача №8.1. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від вертикальної стінки заввишки 2 м повітрю, якщо середня температура стінки $t_w = 120^\circ\text{C}$, а температура повітря на відстані від стінки $t_f = 20^\circ\text{C}$.



К задаче № 8.2

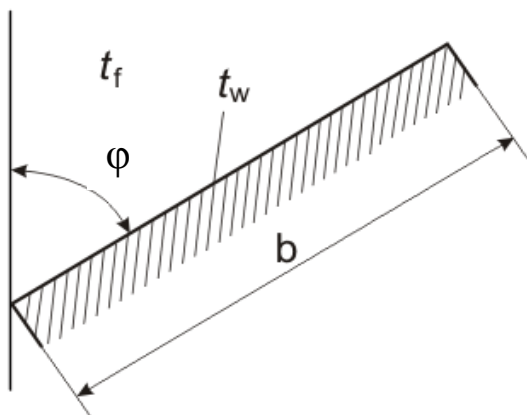
Задача №8.2. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від горизонтальної плити шириною $a = 1 \text{ м}$ і довжиною $l = 3 \text{ м}$, якщо тепловіддача направлена вниз і температура її $t_w = 125 \text{ }^\circ\text{C}$, а повітря на відстані від плити $t_f = 15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача №8.3. Визначити коефіцієнт тепловіддачі α для умов задачі №2, якщо тепловіддаюча поверхня плити направлена вгору.

Задача №8.4. Витковий електронагрівач з ніхромового дроту діаметром $d = 0,5 \text{ мм}$ має температуру $t_w = 500 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити коефіцієнт тепловіддачі на поверхні дроту, якщо температура навколишнього повітря $t_f = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача №8.5. Визначити втрати теплоти горизонтальним трубопроводом із зовнішнім діаметром $d = 57 \text{ мм}$ і довжиною $l = 5 \text{ м}$, що проходить в середині приміщення, повітря якого має температуру $t_f = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура зовнішньої поверхні трубопроводу $t_w = 110 \text{ }^\circ\text{C}$.

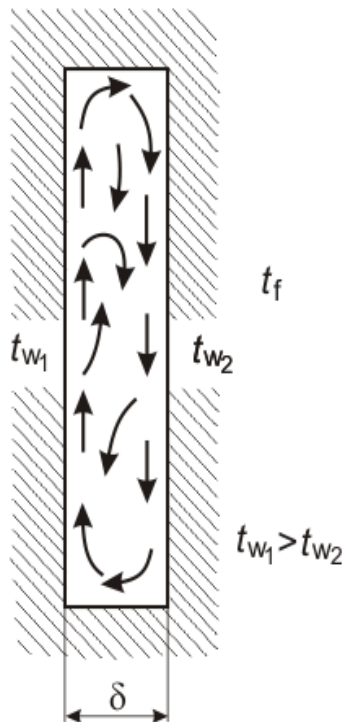
Задача №8.6. Вирішити задачу №8.5 при тих же числових значеннях вихідних даних для випадку, якщо трубопровід розташований в воді, температура якої $t_f = 30 \text{ }^\circ\text{C}$.



До задачі № 8.7

Задача №8.7. Визначити тепловий потік і коефіцієнт тепловіддачі від стінки розміром $a = 1 \text{ м}$ і $b = 2 \text{ м}$, встановленої за великим розміром під кутом $\varphi = 60^\circ$ до вертикалі, якщо температура тепловіддаючої поверхні направлена вгору $t_w = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура повітря $t_f = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача №8.8. Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі і тепловий потік, якщо для умов задачі №8.7 тепловіддаюча поверхня стінки направлена вниз під тим же кутом до вертикалі, а всі інші параметри залишаються без зміни?



До задачі № 8.9

Задача №8.9. Визначити еквівалентний коефіцієнт теплопровідності і густину теплового потоку через повітряний прошарок товщиною $\delta = 30$ мм, якщо температури гарячої та холодної поверхонь стінок, між якими знаходиться повітря, рівні $t_{w1} = 150$ °C и $t_{w2} = 50$ °C.

Задача №8.10. Визначити еквівалентний коефіцієнт теплопровідності і густину теплового потоку q_l через циліндричний повітряний прошарок товщиною $\delta = 20$ мм, якщо температури гарячої та холодної поверхонь відповідно рівні $t_{w1} = 80$ °C, $t_{w2} = 20$ °C, а середній діаметр прошарку $d_{cp} = 100$ мм.

Тема 9. Теплообмін випромінюванням

Мета – освоїти навички вирішення практичних задач. Закони теплообміну випромінюванням. Теплообмін випромінюванням між паралельними стінками. Теплообмін випромінюванням між газом і оболонкою. Радіаційно-конвективний теплообмін.

Закон Планка характеризує спектральну густину потоку випромінювання для абсолютно чорного тіла.

$$E_{0\lambda} = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1},$$

де C_1 , C_2 – перша і друга константи випромінювання, λ – довжина хвилі, T – абсолютна температура.

Закон Віна пов'язує абсолютну температуру тіла і довжину хвилі, що відповідають максимуму випромінювання.

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,9 \text{ мм} \cdot \text{K}$$

де λ_{\max} – максимальна довжина хвилі, T – абсолютна температура.

Закон Стефана-Больцмана. Випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла прямо пропорційна його термодинамічній температурі в четвертій ступені.

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

де T – абсолютна температура, $C_0 = 5,67 \left[\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4} \right]$ – постійна Стефана-Больцмана.

Для реального тіла:

$$E = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

де $\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{C}{C_0}$ – ступінь чорноти тіла.

Закон Кірхгофа встановлює зв'язок між енергією поглинання і випромінювання для абсолютно чорного і довільного тіла в рівновазі.

$$T_1 = T_2 = T_3 = \dots \text{ (рівновага)} \Rightarrow \frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \dots = E_0$$

Співвідношення енергії випромінювання до енергії поглинання для системи тіл в тепловій рівновазі однакове і рівне випромінювальній здатності абсолютно чорного тіла.

$$\frac{E_1/E_0}{A_1} = \frac{E_2/E_0}{A_2} = \dots = \frac{E_n/E_0}{A_n} = 1$$

$$\frac{\varepsilon_1}{A_1} = \frac{\varepsilon_2}{A_2} = \dots = \frac{\varepsilon_n}{A_n} = 1 \Rightarrow \boxed{\begin{matrix} \varepsilon_1 = A_1 \\ \dots \\ \varepsilon_n = A_n \end{matrix}}$$

де E_i – енергія випромінювання i -того тіла, A_i – енергія поглинання i -того тіла, ε_i – ступінь чорноти i -того тіла

Для тіл, що знаходяться в тепловій рівновазі ступінь чорноти тіла дорівнює поглинальній здатності при тій же температурі.

Теплообмін випромінюванням між паралельними стінками:

$$q_{\varepsilon} = c_0 \varepsilon_{np} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad \varepsilon_{np} = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \right)^{-1}$$

де q – густина теплового потоку, ε_{np} – приведена ступінь чорноти, T_1, T_2 – температура першої та другої стінки, C_0 – постійна Стефана-Больцмана.

Радіаційно-конвективний теплообмін. Розглянуті раніше види теплообміну на практиці зазвичай самотійно трапляються рідко. Під час теплообміну між навколишнім середовищем з температурою T_f та стінкою з температурою T_w , сумарна густина теплового потоку буде дорівнювати сумі

густини потоку під час конвективного теплообміну q_k і густини потоку випромінюванням q_ϵ :

$$q = q_k + q_\epsilon = \alpha \cdot (T_w - T_f),$$

де $\alpha = \alpha_k + \alpha_\epsilon$ – коефіцієнт радіаційно-конвективного теплообміну.

Густина теплового потоку випромінюванням:

$$q_\epsilon = c_0 \epsilon_{np} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

$$q_\epsilon = \alpha_\epsilon (T_w - T_f)$$

Звідси, α_ϵ – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням:

$$\alpha_\epsilon = c_0 \cdot 10^{-8} \left[T_f^3 + T_w T_f^2 + T_f T_w^2 + T_w^3 \right] \epsilon_{np}.$$

Задача №9.1. Визначити власну випромінювальну здатність стінки літального апарату і ступінь чорноти з коефіцієнтом випромінювання $C = 4,53 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, якщо температура випромінювальної поверхні стінки $t_w = 1027 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити також довжину хвилі, що відповідає максимуму інтенсивності випромінювання.

Задача №9.2. Визначити радіаційний теплообмін між стінками посудини Дьюара, всередині якого зберігається рідкий кисень, якщо на зовнішній поверхні внутрішньої стінки посудини температура $t_1 = -183 \text{ }^\circ\text{C}$, а на внутрішній поверхні зовнішньої стінки температура $t_2 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$. Стінки посудини покриті шаром срібла, ступінь чорноти якого $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0,02$; площі поверхонь стінок $F_1 \approx F_2 \approx 0,1 \text{ м}^2$.

Задача №9.3. Визначити коефіцієнт радіаційно-конвективного теплообміну і втрати теплоти з одиниці довжини паропроводу діаметром $d = 200 \text{ мм}$, якщо температура і ступінь чорноти його поверхні відповідно рівні $t_w = 467 \text{ }^\circ\text{C}$, $\epsilon = 0,79$, а температура стінок і навколишнього повітря $t_f = 27 \text{ }^\circ\text{C}$.

Рекомендована література:

1. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. М.: Энергоиздат. 1981. - 416 с.
2. *Мухачев Г.А., Щукин В.К.* Термодинамика и теплопередача. М. Изд. Высшая школа. 1991. – 480 с.
3. *Авдеевский В.С., Галицкий Б.М., Глебов Г.А. и др.* Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. М.: Машиностроение. 1975.- 623 с.
4. *Болгарский А.В., Голдобеев В.И. и др.* Сборник задач по термодинамике и теплопередаче. М.: Изд. Высшая школа. 1972. – 302 с.
5. *Константинов С.М.* Теплообмін. К.: Політехніка. 2005. -303 с.
6. *Амерханов Р.А., Харламов Б.Х.* Теплотехника. М.: Энергоатомиздат. 2006. – 431 с.

Фізичні параметри для сухого повітря за тиску 10^5 Па [4]

T , К	t , °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	λ , 10^{-2} Вт/(м·К)	α , 10^{-5} м ² /с	μ , 10^{-6} · (н·с)/м ²	ν , 10^{-6} м ² /с	Pr
223	-50	1,584	1,013	2,04	1,270	14,62	9,23	0,728
233	-40	1,515	1,013	2,12	1,378	15,21	10,04	0,728
243	-30	1,453	1,013	2,20	1,492	15,70	10,80	0,723
253	-20	1,395	1,009	2,28	1,620	16,19	12,79	0,716
263	-10	1,342	1,009	2,36	1,745	16,68	12,43	0,712
273	0	1,293	1,005	2,44	1,881	17,17	13,28	0,707
283	10	1,247	1,005	2,51	2,006	17,66	14,16	0,705
293	20	1,205	1,005	2,59	2,142	18,15	15,06	0,703
303	30	1,165	1,005	2,67	2,286	18,64	16,00	0,701
313	40	1,128	1,005	2,76	2,431	19,13	16,96	0,699
323	50	1,093	1,005	2,83	2,572	19,62	17,95	0,698
333	60	1,060	1,005	2,90	2,720	20,11	18,97	0,696
343	70	1,029	1,009	2,97	2,856	20,60	20,02	0,694
353	80	1,000	1,009	3,05	3,020	21,09	21,09	0,692
363	90	0,972	1,009	3,13	3,189	21,48	22,10	0,690
373	100	0,946	1,009	3,21	3,346	21,88	23,13	0,688
393	120	0,898	1,009	3,34	3,684	22,86	25,45	0,686
413	140	0,854	1,013	3,49	4,034	23,74	27,80	0,684
433	160	0,815	1,017	3,64	4,389	24,52	30,09	0,682
453	180	0,779	1,022	3,78	4,750	25,31	32,49	0,681
473	200	0,776	1,026	3,93	5,136	26,00	34,85	0,680
523	250	0,674	1,038	4,27	6,100	27,37	40,61	0,677
573	300	0,615	1,047	4,61	7,156	29,72	48,33	0,674
623	350	0,566	1,059	4,91	8,187	31,39	55,46	0,676
673	400	0,524	1,068	5,21	9,312	33,06	63,09	0,678
773	500	0,456	1,093	5,74	11,53	36,20	79,38	0,687
873	600	0,404	1,114	6,22	13,83	39,14	96,89	0,699
973	700	0,362	1,135	6,71	16,34	41,79	115,4	0,706
1073	800	0,329	1,156	7,18	18,88	44,34	134,8	0,713
1173	900	0,301	1,172	7,63	21,62	46,70	155,1	0,717
1273	1000	0,277	1,185	8,07	24,59	49,05	177,1	0,719
1373	1100	0,257	1,198	8,50	27,63	51,21	199,3	0,722
1473	1200	0,239	1,210	9,15	31,65	53,46	223,7	0,724

Фізичні параметри води на лінії насичення [4]

t , °C	T , K	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/ (кг·K)	λ , 10 ⁻² Вт/(м·K)	a , 10 ⁻⁵ м ² /с	μ , 10 ⁻⁶ (Н·с)/ м ²	ν , 10 ⁻⁶ м ² /с	β , 10 ⁻⁴ K ⁻¹	Pr
0	273	999,9	4,212	55,1	1,308	1788,4	1,789	-0,63	13,67
10		999,7	4,131	57,4	1,372	1305,7	1,306	+0,70	9,52
20	293	998,2	4,183	59,9	1,433	1004,5	1,006	1,82	7,02
30		995,7	4,174	61,8	1,486	801,5	0,805	3,21	5,42
40	313	992,2	4,174	63,4	1,531	653,3	0,658	3,87	4,31
50		988,1	4,174	64,8	1,570	549,4	0,556	4,49	3,54
60	333	983,2	4,179	65,9	1,606	469,9	0,478	5,11	2,98
70		977,8	4,187	66,8	1,631	406,1	0,415	5,70	2,55
80	353	971,8	4,195	67,5	1,656	355,1	0,365	6,32	2,21
90		965,3	4,208	68,0	1,675	314,1	0,325	6,95	1,95
100	373	958,4	4,220	68,3	1,689	282,5	0,295	7,52	1,75
110		951,0	4,233	68,5	1,703	259,0	0,272	8,08	1,60
120	393	943,1	4,250	68,6	1,711	236,4	0,251	8,64	1,47
130		934,8	4,267	69,8	1,720	217,8	0,233	9,19	1,36
140	413	926,1	4,288	68,5	1,725	201,1	0,217	9,72	1,26
150		917,0	4,313	68,4	1,728	186,4	0,203	10,3	1,17
160	433	907,4	4,346	68,3	1,731	173,6	0,191	10,7	1,10
170		897,3	4,380	67,9	1,728	163,8	0,183	11,3	1,05
180	453	886,9	4,417	67,5	1,722	153,0	0,173	11,9	1,00
190		876,0	4,459	67,0	1,714	144,2	0,165	12,6	0,96
200	473	863,0	4,505	66,3	1,706	136,4	0,158	13,3	0,93
210		852,8	4,556	65,5	1,686	130,5	0,153	14,1	0,91
220	493	840,3	4,614	64,5	1,664	124,6	0,148	14,8	0,89
230		827,3	4,681	63,7	1,645	119,7	0,145	15,9	0,88
240	513	813,6	4,756	62,8	1,622	114,8	0,141	16,8	0,87
250		799,0	4,844	61,8	1,595	109,9	0,138	18,1	0,86
260	533	784,0	4,949	60,5	1,558	150,9	0,192	19,6	0,87
270		767,9	5,074	59,0	1,514	102,0	0,133	22,6	0,88
280	553	750,7	5,230	67,5	1,464	98,7	0,131	23,7	0,90
290		732,3	5,485	55,8	1,389	94,2	0,129	26,2	0,93
300	573	712,5	5,736	54,0	1,320	91,2	0,128	29,2	0,97
310		691,1	6,071	52,3	1,247	88,3	0,128	32,9	1,03
320	593	667,1	6,574	50,6	1,153	85,3	0,128	38,2	1,11
330		640,2	7,244	48,4	1,044	81,4	0,127	43,3	1,22
340	613	610,1	8,165	45,7	0,917	77,5	0,127	53,4	1,39
350		754,4	9,50	43,0	0,789	72,6	0,789	66,8	1,60
360	633	528,0	13,98	39,5	0,536	66,7	0,126	109	2,35
370		450,5	40,32	33,7	1,186	56,9	0,126	264	6,79

**Фізичні параметри трансформаторного масла в залежності
від температури [4]**

t , °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/ (кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\mu, 10^{-4}$ (н·с)/м ²	$\nu, 10^{-6}$ м ² /с	$\alpha, 10^{-8}$ ·м ² /с	$\beta, 10^{-4}$ К ⁻¹	Pr
0	892,5	1,549	0,1123	627,8	70,3	8,14	6,80	866
10	886,4	1,620	0,1115	335,5	37,8	7,83	6,85	484
20	880,3	1,666	0,1106	198,2	22,5	7,56	6,90	298
30	874,2	1,729	0,1008	128,5	14,7	7,28	6,95	202
40	868,2	1,788	0,1090	89,4	10,3	7,03	7,00	146
50	862,1	1,846	0,1082	65,3	7,58	6,8	7,05	111
60	856,0	1,905	0,1072	49,5	5,78	6,58	7,10	87,8
70	850,0	1,964	0,1064	38,6	4,54	6,36	7,15	71,3
80	843,9	2,026	0,1056	30,8	3,65	6,17	7,20	59,3
90	837,8	2,085	0,1047	25,4	3,03	6,00	7,25	50,5
100	831,8	2,144	0,1038	21,3	2,56	5,83	7,30	43,9
110	825,7	2,202	0,1030	18,1	2,19	5,67	7,35	38,8
120	819,6	2,261	0,1022	15,7	1,92	5,50	7,40	34,9